

X線ガンマ線偏光観測小型衛星Polaris

Polaris Working Group

林田清、山内学、上司文善、出口和弘、穴吹直久、常深博(阪大)、村上敏夫、米徳大輔(金沢大)、郡司修一、門叶冬樹、櫻井敬久、柴田晋平(山形大)、三原建弘、玉川徹(理研)、堂谷忠靖、斎藤芳隆、田村啓輔、小浜光洋(JAXA)、小賀坂康志(JST)、古澤彰浩、桜井郁也(名大)、片岡淳(早大)、北本俊二(立教大)、水野恒史、高橋弘充(広島大)、谷森達、窪秀利、身内賢太郎(京大)、川口俊宏(青山学院)

概要: PolarisはX線天体とガンマ線バーストの偏光測定を目的とする小型衛星計画である。X線天体の偏光測定には、スーパーミラーとイメージング偏光計を組み合わせ、2-80keVのワイドバンドの偏光測定をめざす。観測対象はかに星雲の1/100以上の明るさのX線源で、中性子星、ブラックホール、超新星残骸、活動銀河核、銀河団といった天体でX線偏光のはじめての検出を目指す。また、X線天体偏光測定装置とは独立に広視野のガンマ線偏光観測装置を搭載し、ガンマ線バーストの偏光測定を行う。年間10個程度のガンマ線バーストの偏光を測定し、ガンマ線の放射機構の解明を目指す。2010年は、各コンポーネントの基礎開発、進展式光学台の軽量化デザインを行い、現在、姿勢系システムの検討を実施している。2010年打ち上げのIKAROS搭載のガンマ線偏光検出器GAPは軌道上で正常に動作し、気球実験PHENEX, PoGO-Lite、2014年打ち上げ予定の軟X線偏光観測小型衛星GEMSの準備もすすんでいる。Polarisは、これらの開発成果もとりこみ、硬X線領域を中心としたワイドバンド偏光観測をめざす。

X線ガンマ線偏光観測は革命前夜: かに星雲からのガンマ線偏光検出(INTEGRAL)の報告、軟X線偏光観測小型衛星GEMSの打ち上げ確定、GAP、そしてPolaris

X線偏光が期待される天体とその物理

シンクロトロン放射(磁場と高エネルギー電子の観測)

- 超新星残骸(パルサー星雲、シェル型)
- ブレーザー、クェーサー

コンプトン散乱(天体の構造)

- ブラックホール周辺の降着円盤
- セイファート銀河の降着トーラス
- 銀河中心の反射星雲

磁場と散乱の複合

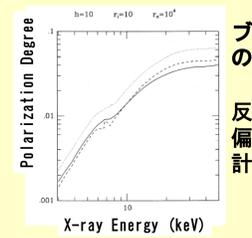
- 連星系パルサー

偏光のX線エネルギー依存性が鍵
特に硬X線領域のバンドが重要



かに星雲

$P=19\% @ 2.6\text{keV}$, $20\% @ 5.2\text{keV}$ の偏光が検出されている(Weisskopf et al., 1978)。X線偏光が検出されている現在唯一の天体。
X線画像はCXO/NASAによる

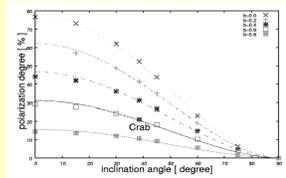


ブラックホール周辺の降着円盤

反射成分によるX線偏光期待値(モデル計算)

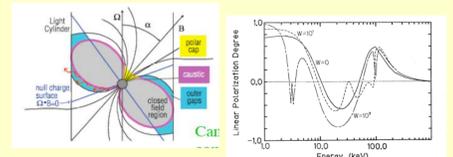
Matt, 1993, MNRAS 260

パルサー星雲からの偏光(モデル計算)
(Nakamura & Shibata 2007, MNRAS 381, 1489)



パルサー星雲の予想されるX線偏光度をパルサー回転軸と視線との角度および乱流率 $b=(\delta B/B)$ の関数として表した。

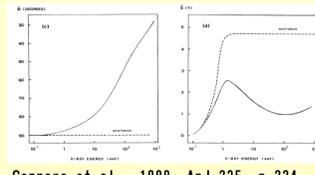
パルサー、連星系パルサー



Swank et al., 2004 SLAC symposium

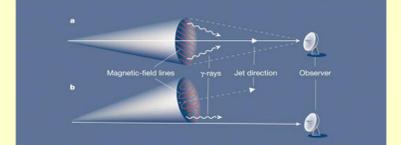
Kii, 1987, PASJ 39, p. 781

ブラックホール周辺での時空の曲がりによる偏光



Connors et al., 1980, ApJ 235, p. 224

ガンマ線バーストの火の玉モデルと偏光



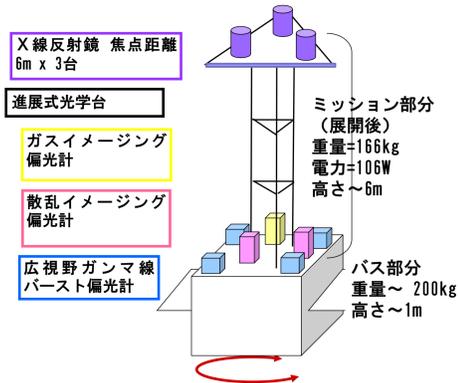
Waxman, 2004, Nature 423, p. 388

ワイドバンドX線天体偏光観測装置

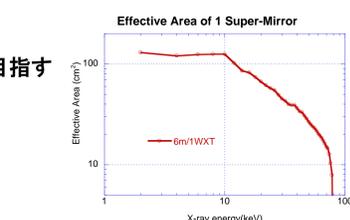
6m焦点距離のX線反射鏡3台(ASTRO-H衛星用多層膜スーパーミラー1/2スケールモデル)の焦点面に

- ・軟X線用ガスイメージング偏光計 1台
- ・硬X線用散乱型イメージング偏光計 2台

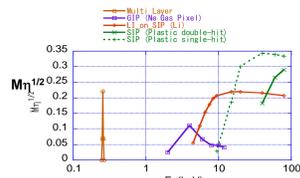
を設置し、ワイドバンド、高S/N比のX線偏光測定を目指す



対象を1-2°の精度で視野に捉えたまま(基本的に三軸制御)衛星全体を0.1RPM程度で回転させる。これにより偏光測定系の系統誤差を最小限におさえる。



多層膜スーパーミラー1台の有効面積



各偏光計の性能因子

広視野ガンマ線バースト偏光計

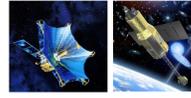
ガンマ線バースト(GRB)の偏光測定を目的とする、広視野の散乱型偏光計を4台、サブ観測機として搭載する。2010年に打ち上げられたIKAROS搭載のGAP(右写真; P1-073参照)は軌道上で正常に動作し、GRBの偏光観測(週に1発程度を検出)を続けている。Polaris搭載用GRB偏光計はGAPをプロトタイプとして開発される。



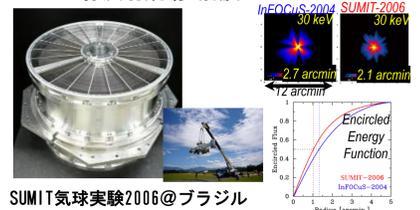
観測目標は、30%以上の偏光度を持つGRBであれば10発/年、10%以上のものは数発/年。

伸展式光学台

HARUKA, ASTRO-H用の三角マスト進展機構をベースに、機械構造モデルの検討を実施した。ミラー3台とEOB合計の重量113kgまで軽量化できる見込みである。固有振動数は1Hz以上を確保しており、進展精度も目標をクリアしている。

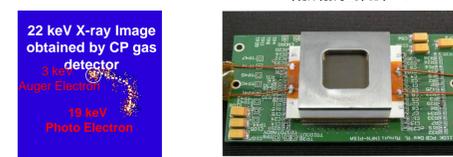


X線反射鏡(多層膜スーパーミラー)



SUMIT気球実験2006@ブラジル

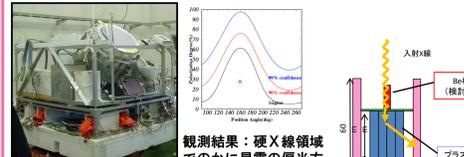
(焦点面用) ガスイメージング偏光計



2.6keV X線の偏光測定にも成功している。シミュレーションでもよく再現できる

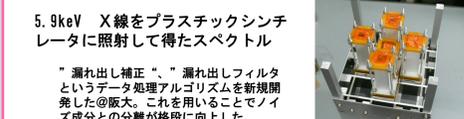
・INFNグループの密封MPGDと理研他開発のGEMを組み合わせた国際協力の実験もおこなっている。理研他開発のGEMが、HV=0直後の安定度、重イオン照射に対する耐久性に優れていることが証明され、2014年打ち上げ予定のGEMS衛星(アメリカ他; 軟X線偏光観測小型衛星)に採用される。

(焦点面用) 散乱イメージング偏光計

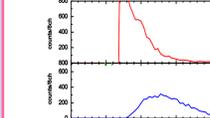


2006年 PHENEXかに星雲観測気球実験(2009年にも実施した)

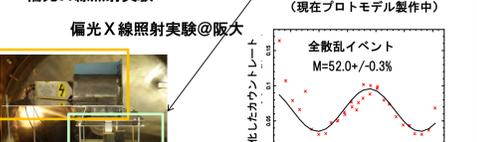
PHENEX偏光計を原型に衛星搭載用焦点面偏光計として開発中
・CsI (orGSO)信号はプラスチック用と独立の増倍管で検出
・散乱光子検出用のシンチレータはCsI(Tl)、BGO、GSOをテスト。GSOが最有力候補
・光電子増倍管はUBA光電面。同シリーズモデルで耐震実証済み
・GEANT4によるシミュレーション
・新規データ処理法の開発
・偏光X線照射実験



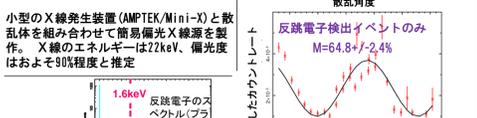
5.9keV X線をプラスチックシンチレータに照射して得たスペクトル



“漏れ出し補正”、“漏れ出しフィルタ”というデータ処理アルゴリズムを新規開発した@阪大。これを用いることで、ソース成分との分離が格段に向上した。



偏光X線照射実験@阪大



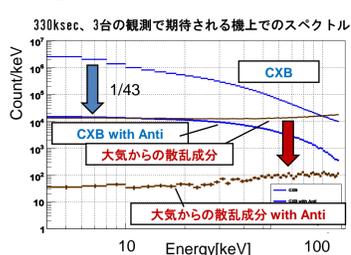
小型のX線発生装置(MPTEK/Mini-X)と散乱体を組み合わせて簡易偏光X線源を製作。X線のエネルギーは72keV、偏光度はおおよそ80%程度と推定

世界最先端の装置を結集

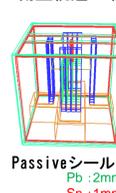
コンポーネント	開発体制	実績、現状
散乱イメージング偏光計	国内共同開発(阪大、山形大、金沢大、京大、広島大、早大、理研他) 浜松ホトニクス	PHENEX気球実験2006でかに星雲観測 PHENEX気球実験2009実施 PoGO-Lite気球実験2011準備中
広視野ガンマ線バースト偏光計		ソーラーセイルIKAROS搭載用GAPが軌道上で正常動作
ガスイメージング偏光計	イタリアINFNとの国際協力(理研、山形大他)を協議中	日本で3グループが独立開発; 放射光施設で偏光検出成功 衛星搭載用システムとして完成@イタリア GEM(理研他)がGEMS衛星に採用される
X線反射鏡(多層膜スーパーミラー)	国内共同開発(名大他)	InFOCUS気球実験2001でCygX-1などの硬X線イメージ取得成功 SUMIT気球実験2006を実施
伸展式光学台	JAXA, 阪大他 日本飛行機	HARUKA, ASTRO-H用三角マストモデルをベースに機械性能検討

10mCrabの天体(e.g. 明るいAGN)もターゲットとする

GEANT4を用いたバックグラウンドのシミュレーション(散乱イメージング偏光計に対して)



人工衛星軌道上(高度~500km)での放射線環境を模擬



さらに(この計算では)BGOを外側に立ててAntiとして用いる
残留バックグラウンドは入射全面に対して30mCrab。ソースに対してはミラーの集光能力が活用できるので、10mCrabの天体の偏光測定が見込める。

まとめ:

Polaris衛星は、X線天体のワイドバンド偏光測定とガンマ線バーストの偏光測定を目的とした小型衛星である。偏光測定を通してX線、ガンマ線天文学のブレークスルーをねらう。搭載観測装置は日本が世界をリードする最先端の装置を結集したものであり、一部国際協力を導入しより強力なものとした。複数のコンポーネントが既に気球実験の実績をもつが、衛星搭載に向けた改良、試験は必要で、現在チームで分担して作業をすすめている。特筆すべきは、2010年に打ち上げられたIKAROS搭載のGAPが正常動作し、ガンマ線バーストの偏光観測を続けていることである。この成果はそのままPolaris衛星に直結する。焦点面に設置する撮像偏光検出器のうち、散乱タイプのプロトタイプは地上実験で偏光検出に成功し、また、ガスタイプ用の電極(GEM)はGEMS衛星搭載に向けて開発が進んでいる。平行して、姿勢系システムの概念デザインをすすめている。